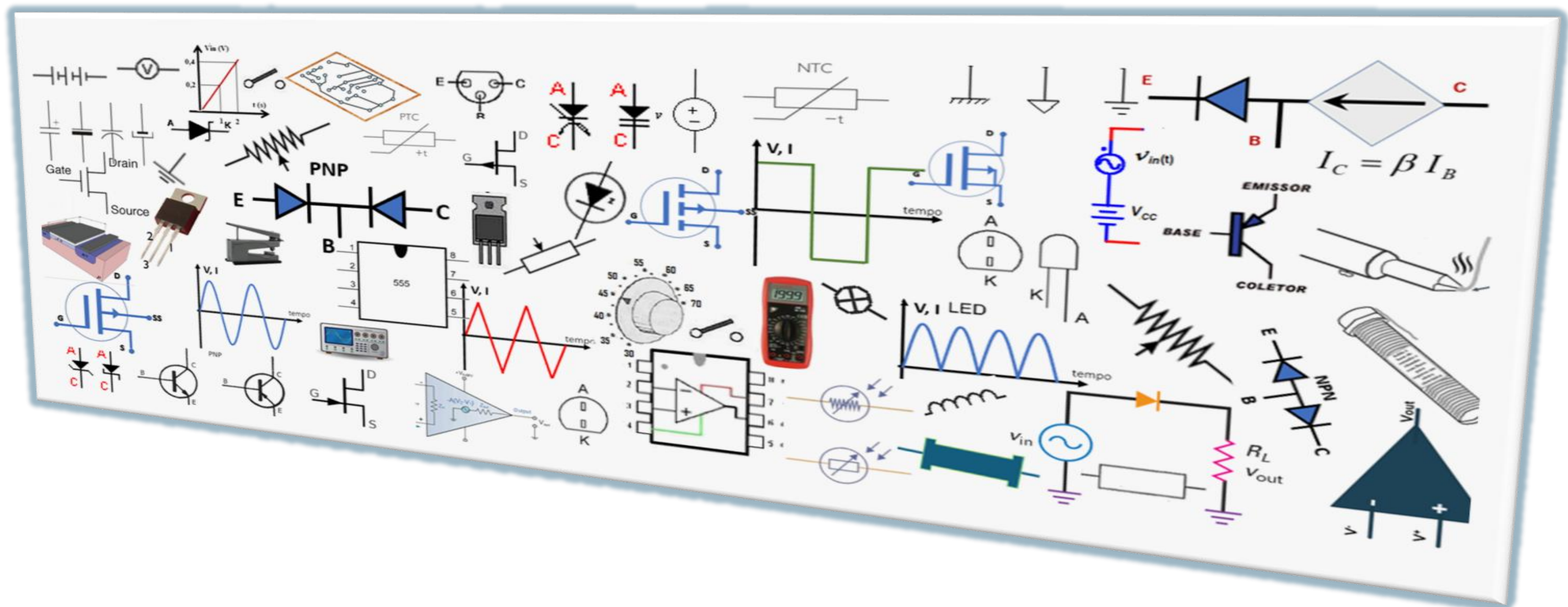
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA - DAELT
Amplificadores Operacionais e Semicondutores – ELT74E
Prof.ª Elisabete Nakoneczny Moraes

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA

# MODELO ELÉTRICO DO DIODO SEMICONDUTOR

## AOS02- MODELO ELÉTRICO, TIPOS DE RESISTÊNCIAS DO DIODO, ASSOCIAÇÕES SÉRIE E //




Curitiba, 7 de outubro de 2024. (S24)
Curitiba, 8 de outubro de 2024. (S25/S26)

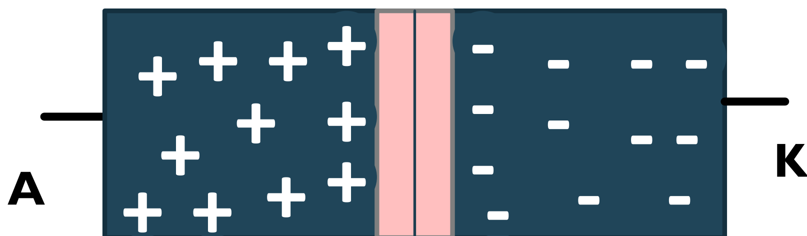
# AGENDA

1. Revisão
2. Modelo elétrico
    a. Efeito resistivo
    b. Efeito capacitivo
3. Exercícios e exemplos

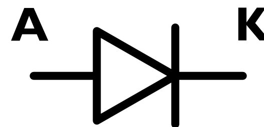
# Revisão:

- ✓ Dispositivo eletrônico de estado sólido, não linear, polarizado.
- ✓ Atua como chave eletrônica desde que polarizado para isto.
- ✓ Símbolo remete a uma seta que aponta para o sentido convencional da corrente elétrica e que aponta para o cristal N.
- ✓ Pode ser de silício (Si➔ Vj =0,7 V) ou germânio (Vj➔ 0,3 V).
- ✓ A estrutura cristalina é formada a partir do **cristal intrínseco** e que foram convenientemente dopados que dão origem ao cristal tipo P ➔ terminal de anodo (A) e o cristal tipo N➔ terminal de catodo (K).
- ✓ Após dopados são cristais são denominados como **cristais extrínsecos**.

Estrutura cristalina




Símbolo




Componente real



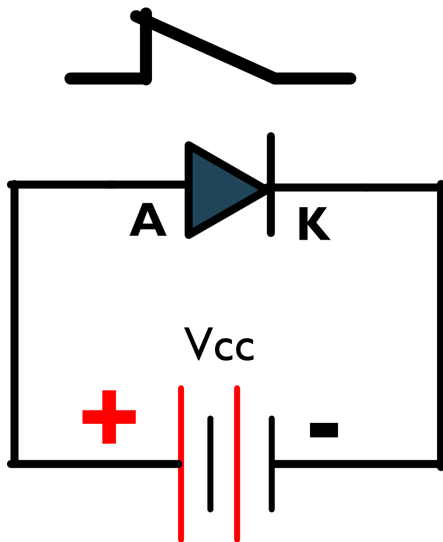
# Detalhamento da avaliação da **teoria**

chave eletrônica

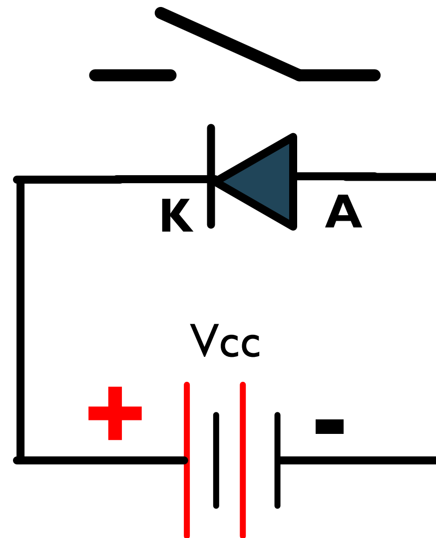
- Tensão camada de depleção "$V_F$, $V_j$, $V_{TH}$, $V_{th}$"
- Corrente de saturação, na faixa de μA, nA

Operação IDEAL: como chave eletrônica que permite a corrente circular por apenas um sentido.

**Polarização DIRETA**




**Polarização REVERSA**



# Revisão: modelo matemático

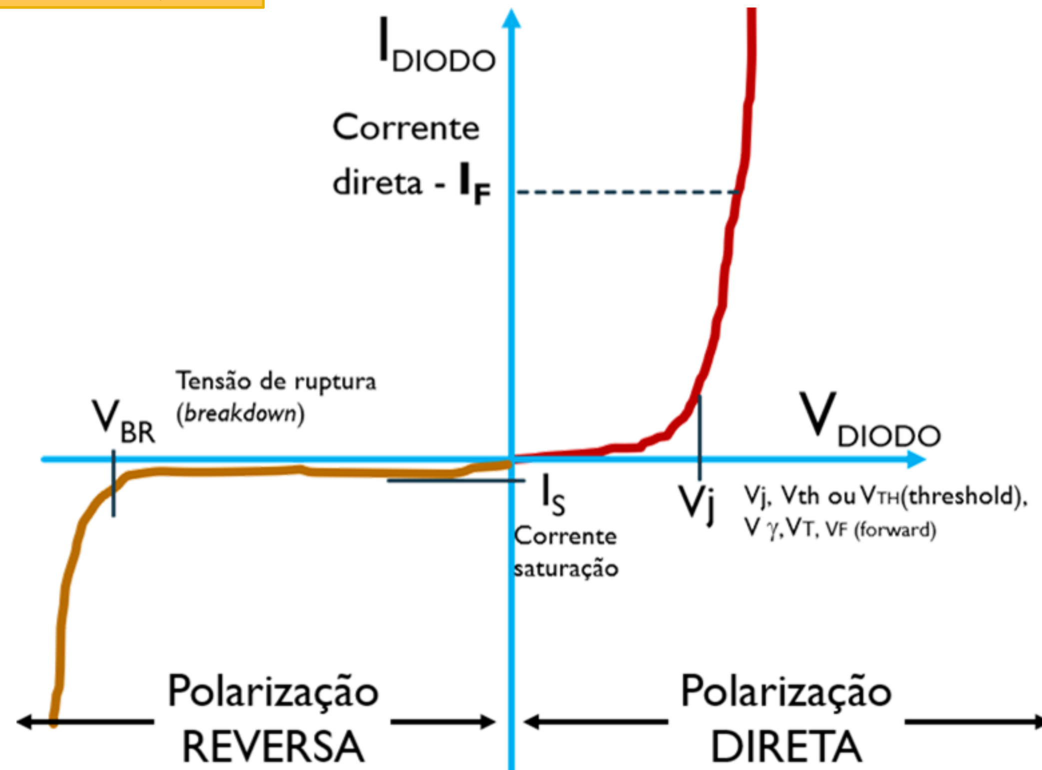
O comportamento do diodo **real** é representado graficamente pela curva característica $I_{diodo} = f(V_{diodo})$ que matematicamente é expressa pela equação:

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$

Onde:

- $I_D$ = corrente no diodo (A)
- $I_S$ = corrente de saturação (A)
- $V_D$ = tensão nos terminais A-K diodo (V)
- η= coeficiente de emissão. $1 \leq \eta \leq 2$.
- $V_T$ = tensão térmica (V).

$V_D$ = positivo na polarização direta
$V_D$ = **negativo** na polarização **reversa**




Tensão térmica: $V_T = \frac{kT}{q}$

Onde:

k = constante de Boltzmann = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K.
T = temperatura absoluta em K (273 ºC + ºC)
q = carga elétrica do ***é*** = $1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

# Influência da temperatura

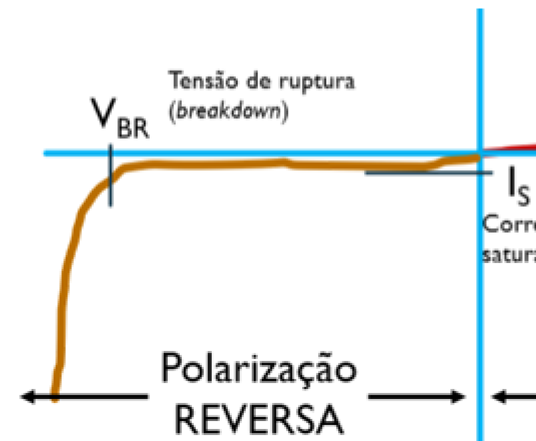
- Tensão térmica-$V_T$: adotar 25 mV ou 26 mV para a tensão térmica na temperatura ambiente se nada informado.

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

k = constante de Boltzmann = 1,38x10$^{-23}$ J/K.
T = temperatura absoluta em K (273 ºC + ºC)
q = carga elétrica do ***é*** = 1,6x10$^{-19}$ C.

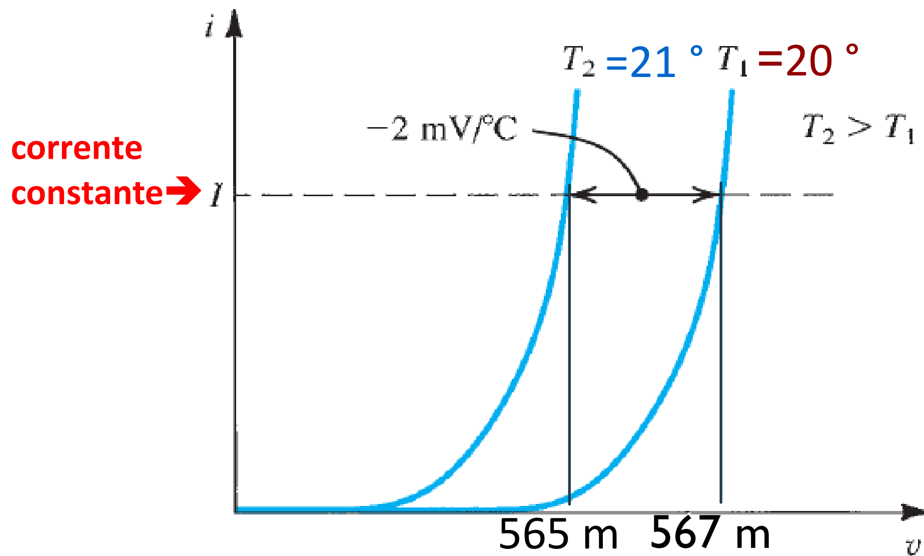
- Corrente de saturação-$I_S$: para temperaturas diferentes da ambiente, usa a regra prática de que a corrente Is dobra de valor a cada 10 ºC de aumento da temperatura.

$$I_{S_Tnew} = I_{S_T}\,(2)^{\frac{(Tnew-T)}{10}}$$



# Influência da temperatura

- Coeficiente de temperatura: para uma corrente constante, a tensão $V_F$ ($V_j$, $V_{th}$, $V_\gamma$), diminui aproximadamente 2 mV para incremento de 1 ºC .

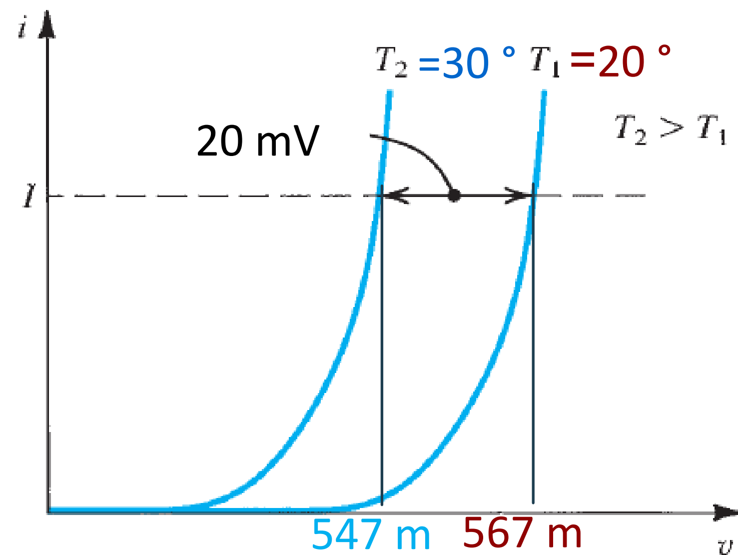



Créditos: Sedra & Smith, capítulo 3, p.128.

A existência do símbolo "@" junto à uma grandeza tem o significado "na condição de operação"
$V_F$@20 °C=567 mV → significa que: a tensão direta é 0,567 V em 20 °C.

Exemplo: Determine a tensão $V_F$ para t = 30 °C, tendo como referência a figura ao lado.
$V_F$@20 °C = 567 mV

Para 30 °C:
30 ° = 567 m + (-2m)(10)
Vj@30 °C = 547 mV



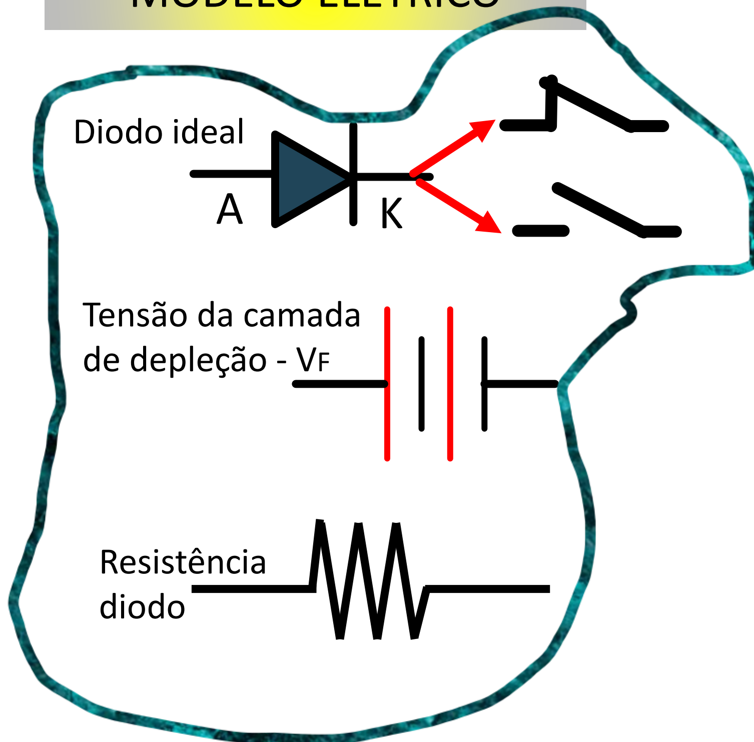
# Modelo do diodo

Uso de elementos elétricos básicos que descrevam de forma satisfatória a operação do elemento sob investigação para um determinado cenário.

Modelo matemático: adequado para ser empregado em simuladores de circuitos elétricos/eletrônicos.



MODELO ELÉTRICO




MODELO MATEMÁTICO
Junção PN

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$

No modelo matemático são incluídas informações sobre:

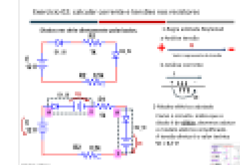
-natureza da polarização;

-temperatura de operação ($V_T$);

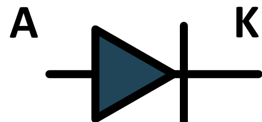
-nível de dopagem ($\eta$);

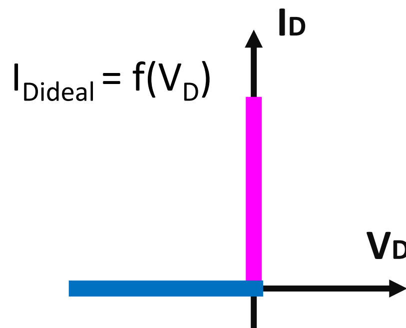
-detalhamento do comportamento da tensão e corrente na região do joelho (*knee*).

# Modelo elétrico ↔ Curva característica

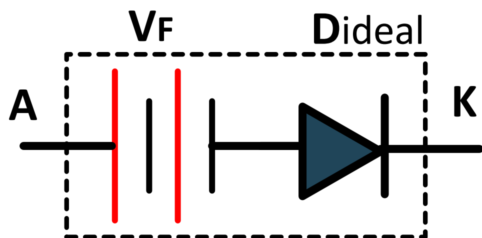


IDEAL =1ª aprox.

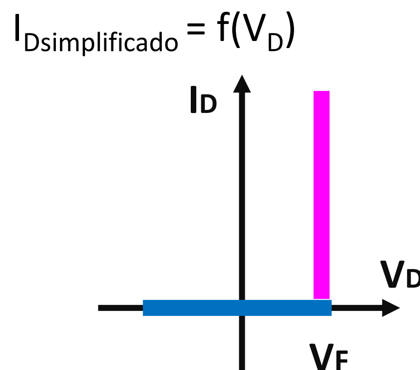


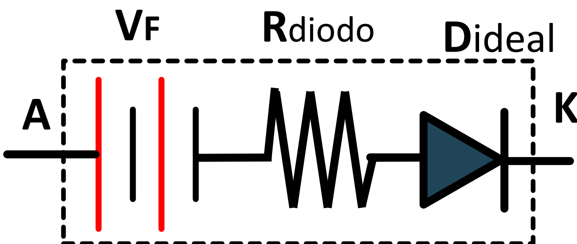

SIMPLIFICADO = 2ª aprox.

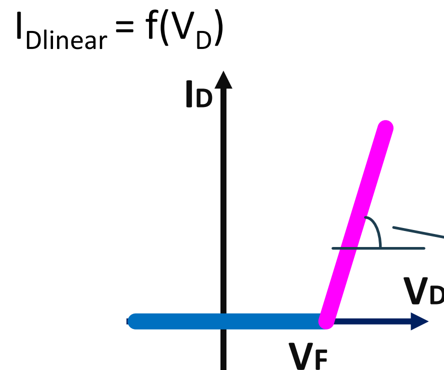



VF Si = 0,7 V | VF Ge = 0,3 V



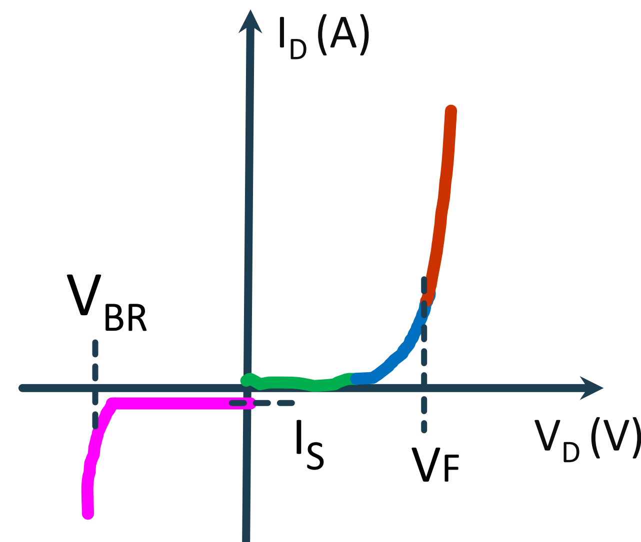

LINEAR = 3ª aprox.




Curva característica do diodo

ID = f(VD)




$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$$

Inclinação é representada pela Rdiodo no modelo linear.

# Níveis de resistência do diodo

- Resistência elétrica: oposição à passagem da corrente elétrica.
- Corrente elétrica desde que exista uma fonte de tensão.

Dependendo da ***natureza*** da fonte de tensão, diodo irá se por à passagem da corrente elétrica da seguinte forma:

| Resistência | *Natureza* da fonte | Equação |
|---|---|---|
| DC ou Estática ($R_{DC}$) | $V_D$ Fonte CC (DC) | $R_D = \frac{V_D}{I_D}$ |
| Resistência AC ou Dinâmica ($r_d$) | Vd(t) $V_D$ Fonte CC + Fonte AC | $r_D = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26m}{I_D}$ |
| Resistência AC média | Vd(t) Fonte CA (AC) | $r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}\bigg]pt\ a\ pt$ |

# Efeitos capacitivos de derivação

Altas frequências e/ou eletrônica de potência

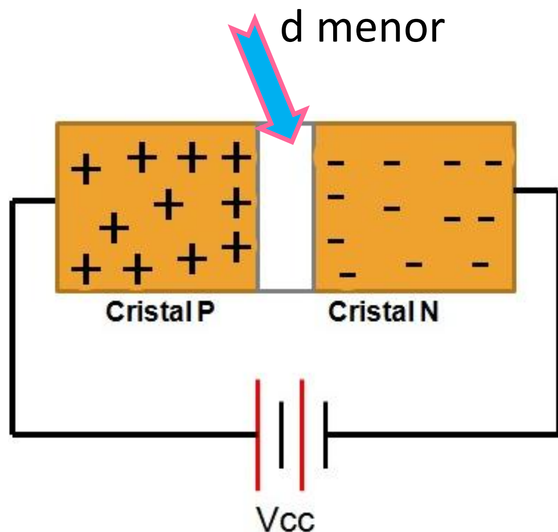
Muitos efeitos capacitivos de derivação podem ser ignorados em semicondutores, pois o capacitor comporta-se como um circuito aberto, porém em **frequências elevadas e/ou aplicações de alta potência**, esse efeito não pode ser ignorado.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \begin{cases} \uparrow f \Rightarrow X_C \rightarrow 0 \\ \downarrow f \Rightarrow X_C \rightarrow \infty \end{cases}$$

Nos diodos, os efeitos capacitivos decorrem em ambas as polarizações:

❖Na polarização direta, tem-se a capacitância de difusão ($C_D$) ou de acumulação;

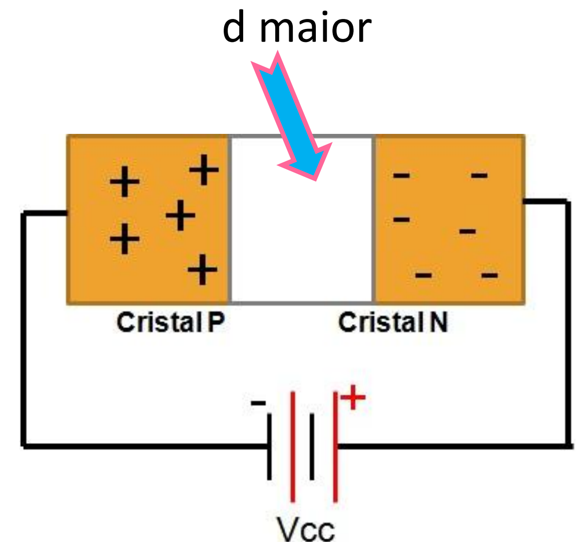
❖Na polarização reversa, ocorre a capacitância de transição ou depleção ($C_T$).




$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

$$\uparrow d \Rightarrow C \rightarrow menor$$

$$\downarrow d \Rightarrow C \rightarrow maior$$



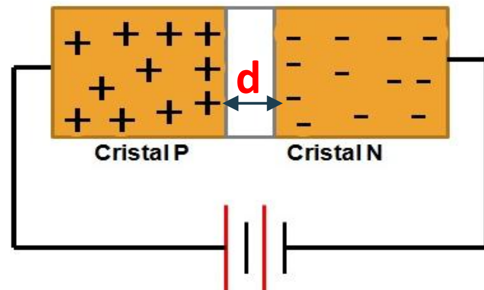
# Efeitos capacitivos de derivação

Altas frequências e/ou eletrônica de potência

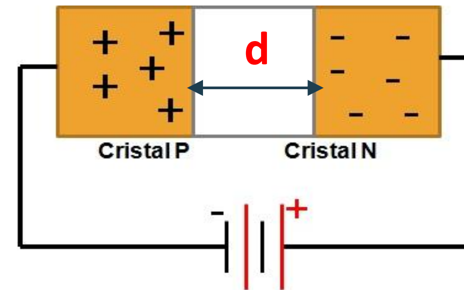
A camada de depleção, comporta-se essencialmente como uma região sem portadores portanto um isolante entre camadas opostas.

Na polarização reversa, essa camada aumenta, ou seja, a distância “d” é maior, o que resulta em uma redução na capacitância nesta região.

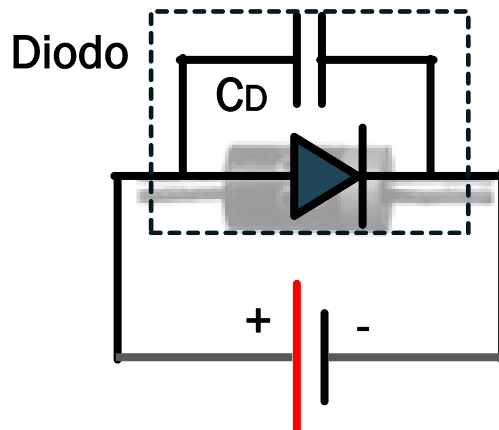
**Capacitância de difusão**

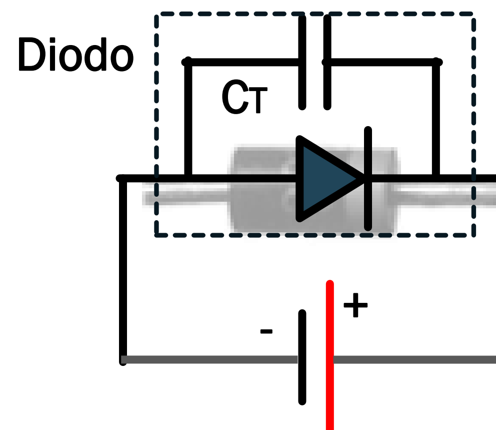



**Capacitância de transição**




Modelo elétrico considerando os efeitos capacitivos

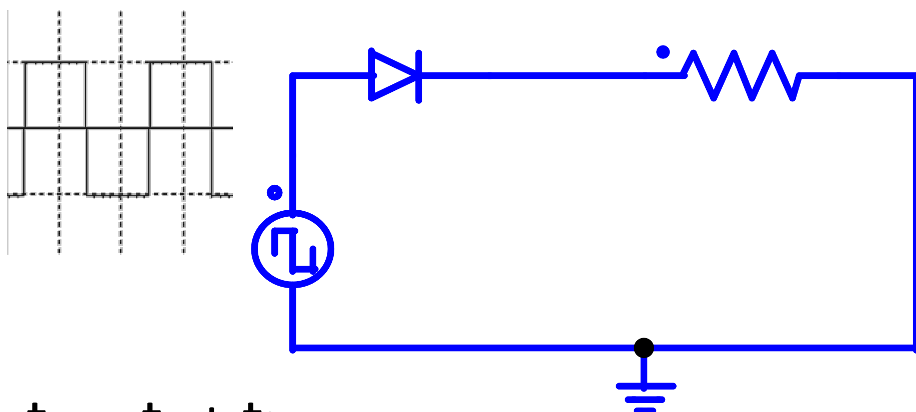


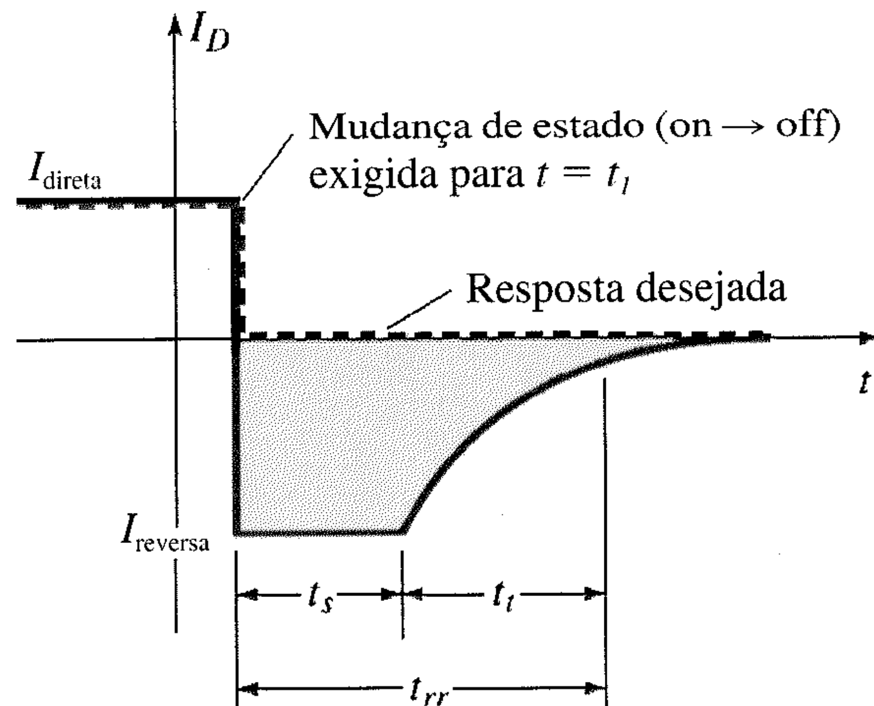



# Tempo de restabelecimento reverso

Altas frequências e/ou eletrônica de potência

Quando o diodo é submetido a variação no estado de condução ←→ não condução, os portadores levam um tempo para se reorganizarem.
Esse intervalo de tempo, definido como tempo de armazenamento ($t_s$) é para que os portadores minoritários voltem a condição de portadores majoritários.
Durante o processo de acomodação, ocorrerá um curto circuito que é limitado pelas características do próprio circuito,
Finalizada esta condição, a corrente reversa diminui aos níveis associados ao estado de não condução, que define o tempo de transição.






$t_{rr} = t_s + t_t$

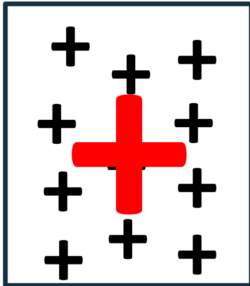
Deve ser observado em aplicações de chaveamento

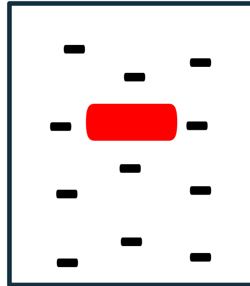
$t_s$= tempo de armazenamento
$t_t$ = tempo de transição

# Revisão: potencial "+" & "−"

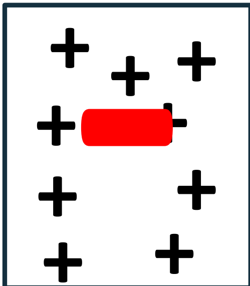
Corpo A | Corpo B

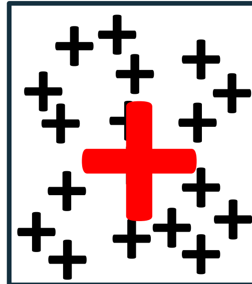
a)



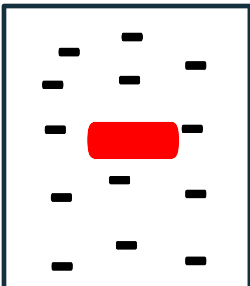


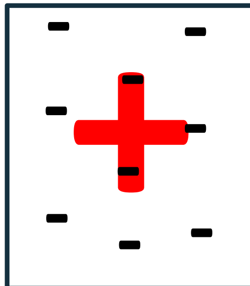
b)





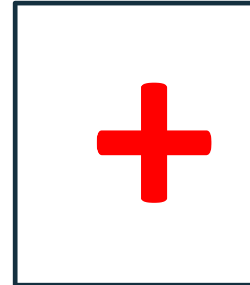
c)

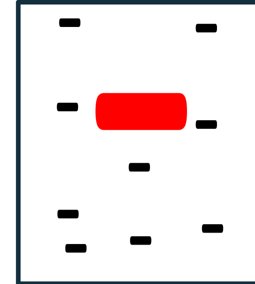




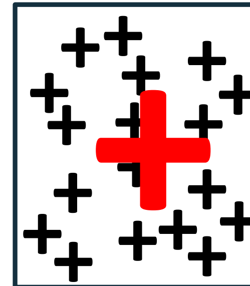
Corpo A | Corpo B

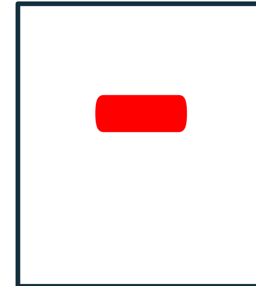
d)





e)



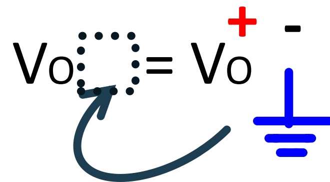


# Exercício 01- DDP entre um potencial e a referência

Calcule qual é o valor de Vo?

Vo=Vout

Significado da nomenclatura “Vo” :




E1
15 V

R1
5k2

D1

R2
3k3

+

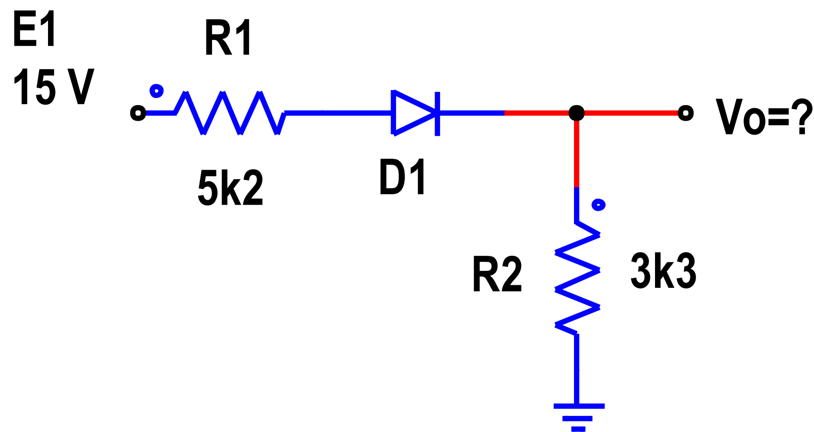
-

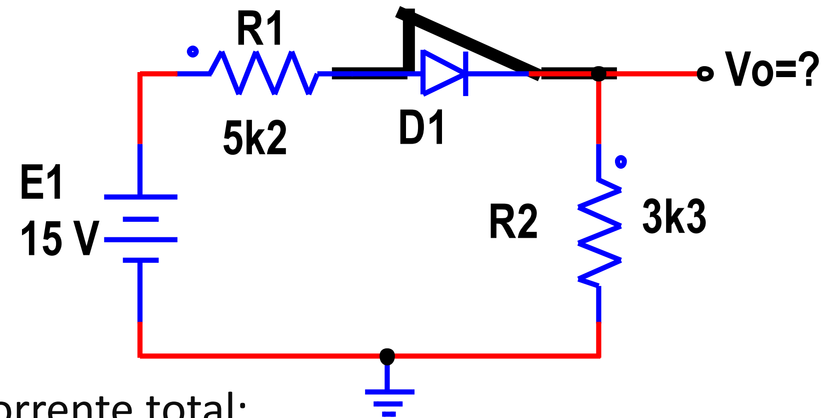
Vo=?
Vo

iCEL MD-6130
0.000

# Exerc01-Cálculo de Vo e corrente do circuito

Neste exercício, a decisão sobre qual o modelo elétrico a ser adotado é por meio da informação sobre o material do diodo.




Corrente total:

$$I = \frac{E1}{R1 + R2} = \frac{15}{8500} = 0{,}00176\ A$$

$$I = 1{,}76\ mA$$

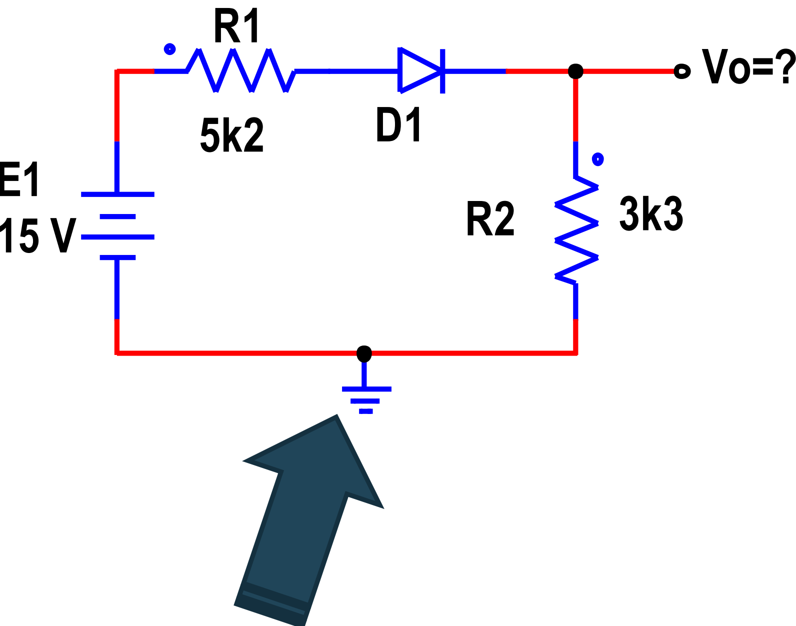
Prezar pela notação de engenharia

Tensão Vo:

É a tensão medida entre o ponto indicado (Vo) e a referência, que é a tensão sobre R2.

$$Vo = VR2 = (3k3)(1{,}76m)$$

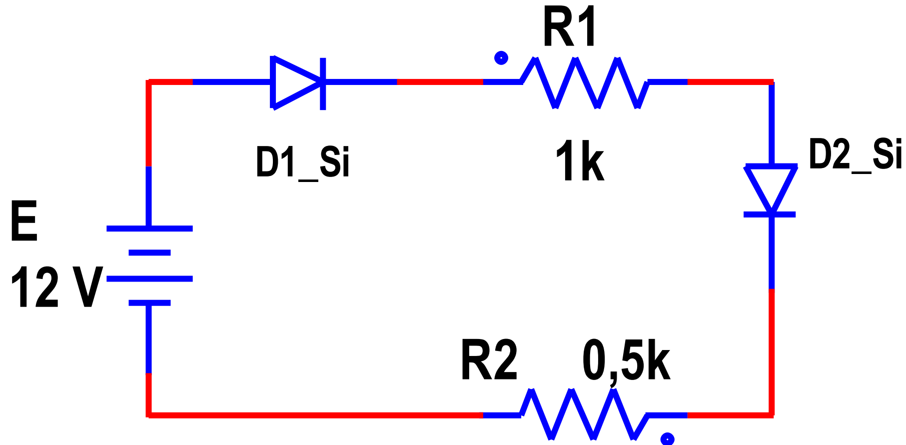
$$Vo = 5{,}82\ V$$




Referência, terra, gnd, *ground*

# Exercício 02: calcular corrente e tensões nos resistores

**Circuito 1: diodos em série diretamente polarizados.**



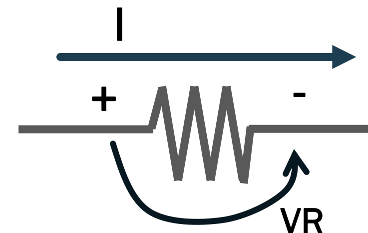

Regra adotada Boylestad

1-Análise tensão




Vetor representa da tensão

2-Análise corrente



# Exercício 02: calcular corrente e tensões nos resistores

**Diodos em série diretamente polarizados.**

R1
D1_Si
1k
D2_Si
E
12 V
R2 0,5k

D1_Si
VF
R1
A
K
1k
A
E
12 V
D2_Si
VF
R2 0,5k
K

Modelo elétrico

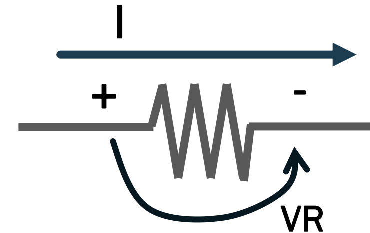
1-Regra adotada Boylestad

a-Análise tensão



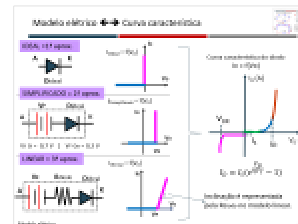

Vetor representa da tensão

b-Análise corrente



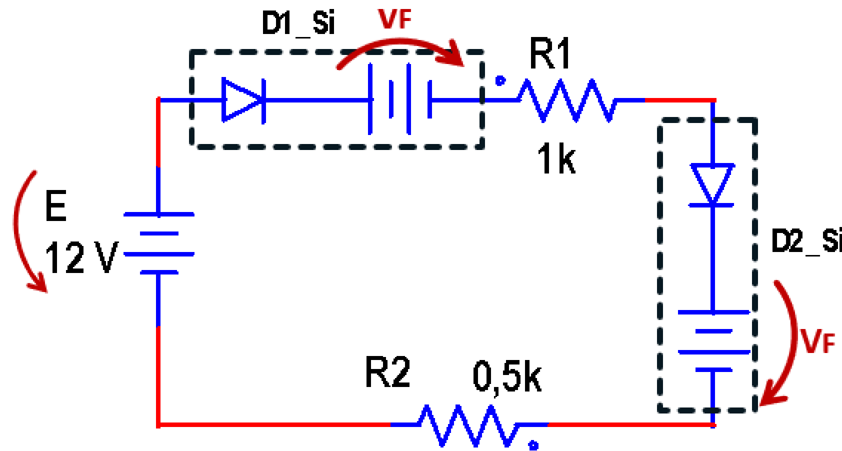

2-Modeo elétrico adotado

Como o circuito indica que o diodo é de **silício**, devemos adotar o modelo elétrico simplificado.
A tensão direta é o valor teórico
**$V_F$ = 0,7 V**



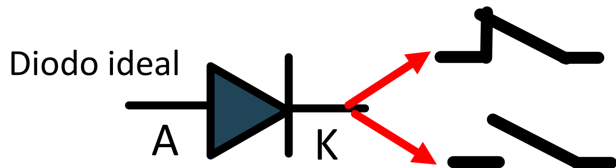
# Exercício 02: calcular corrente e tensões nos resistores

**Diodos em série diretamente polarizados.**

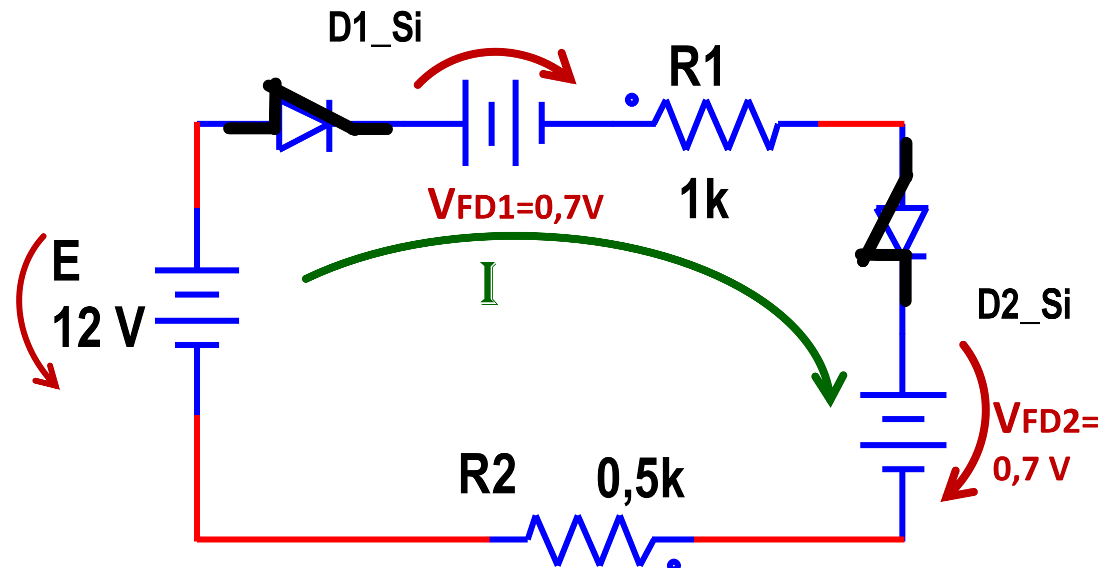



3- Avaliar a condição do diodo:

* Se diretamente

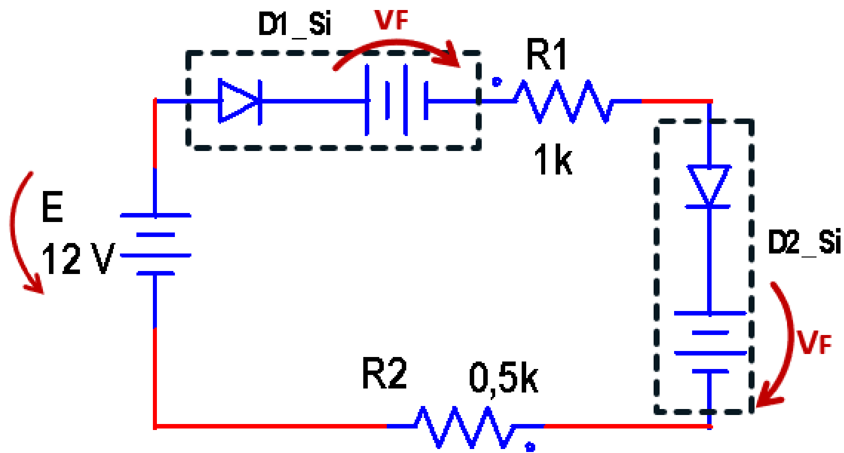


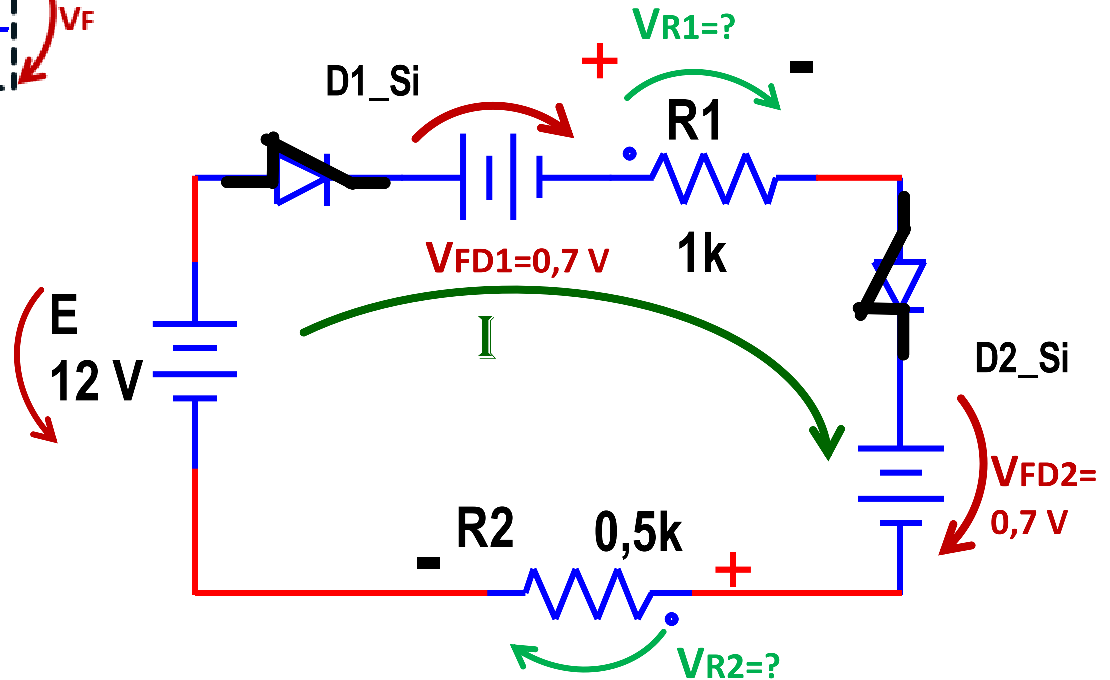

* Se reversamente



# Exercício 02: calcular corrente e tensões nos resistores

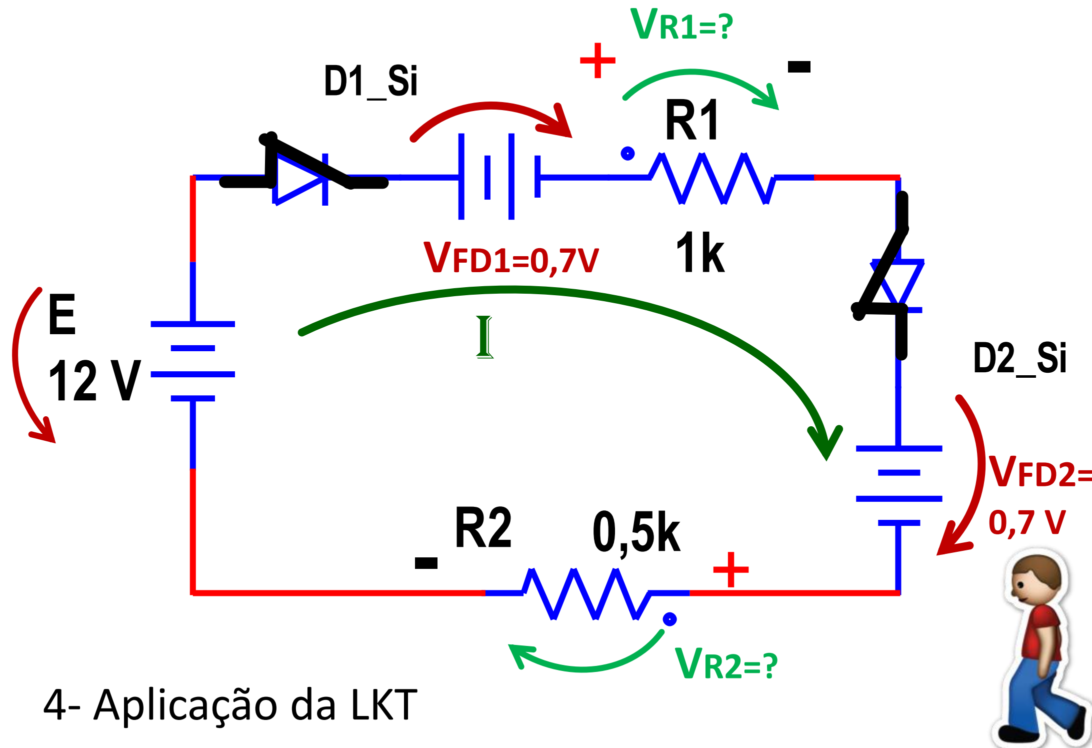
**Diodos em série diretamente polarizados.**



Exercício 02: calcular corrente e tensões nos resistores

**Diodos em série diretamente polarizados.**




4- Aplicação da LKT

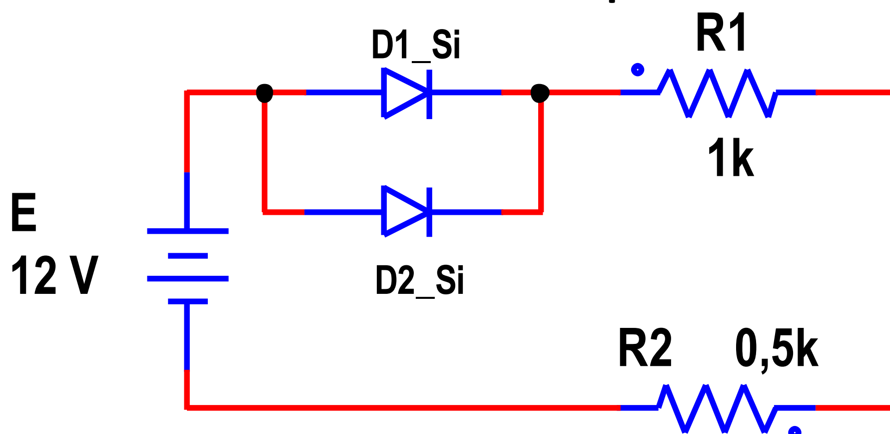
Sentido de saída do bipolo

$$E - V_{FD1} - V_{R1} - V_{FD2} - V_{R2} = 0$$

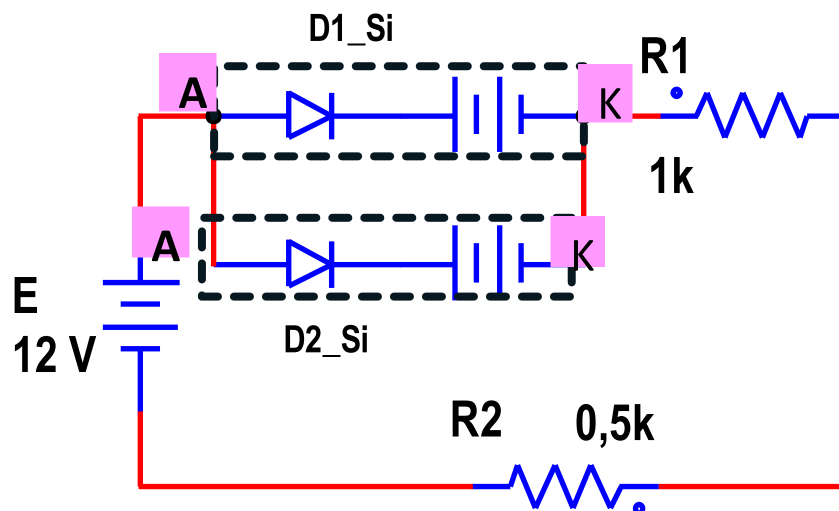
$$E - V_{FD1} - V_{FD2} = V_{R1} + V_{R2}$$

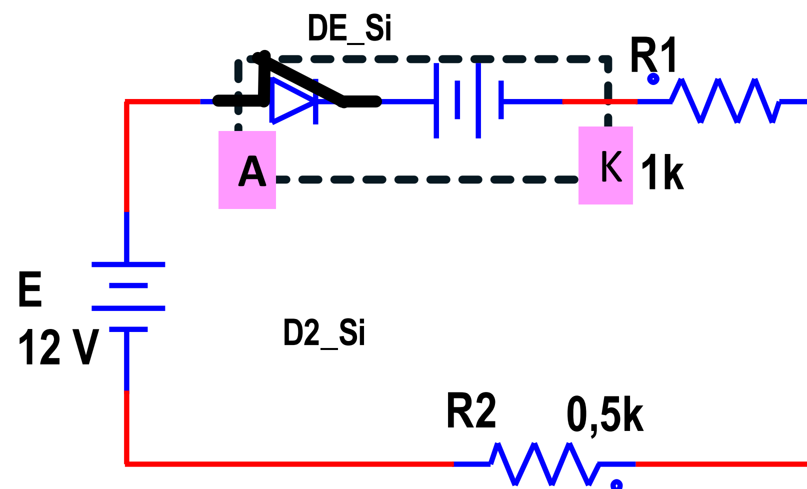
# Exercício 03: calcular corrente e tensões nos resistores

**Diodos mesmo material em paralelo diretamente polarizados.**



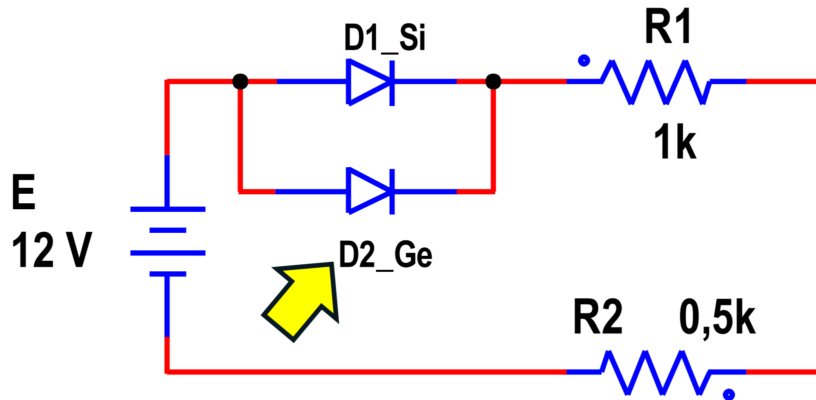

Quando os diodos estiverem em paralelo e se forem do mesmo material, a análise será feita considerando o equivalente do conjunto.



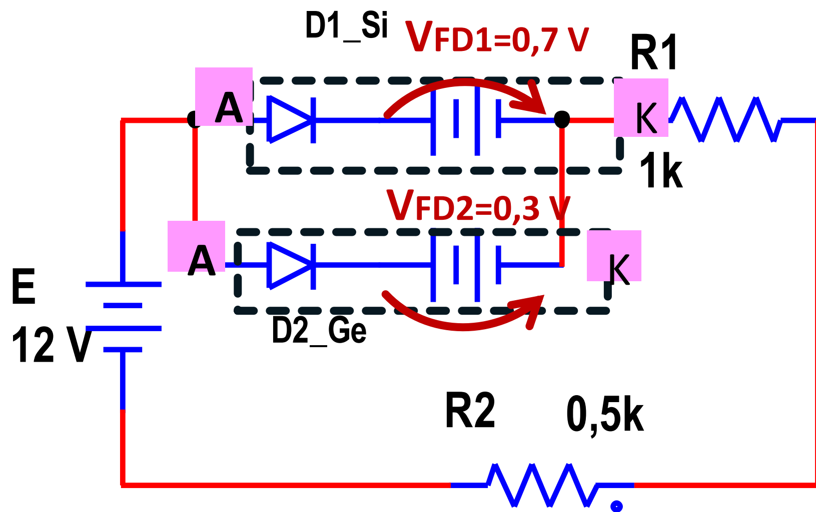



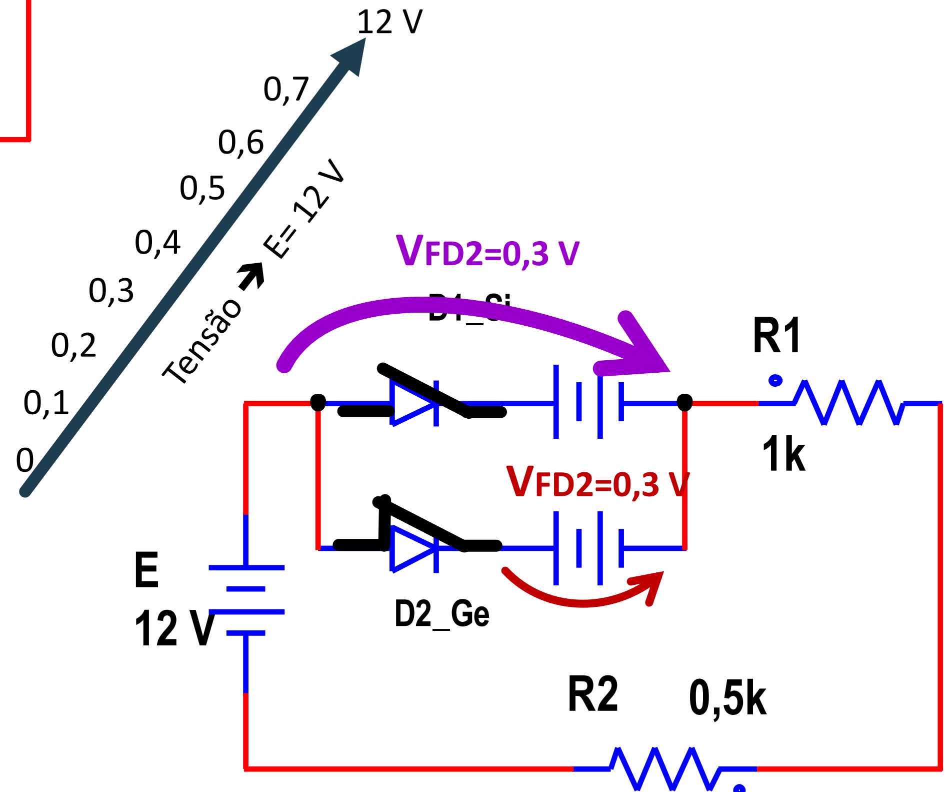
# Exercício 03: calcular corrente e tensões nos resistores

**Diodos diferentes materiais em paralelo diretamente polarizados.**




Quando os diodos estiverem em paralelo e diferente material, a análise será feita considerando a condução do diodo que possuir menor tensão direta.

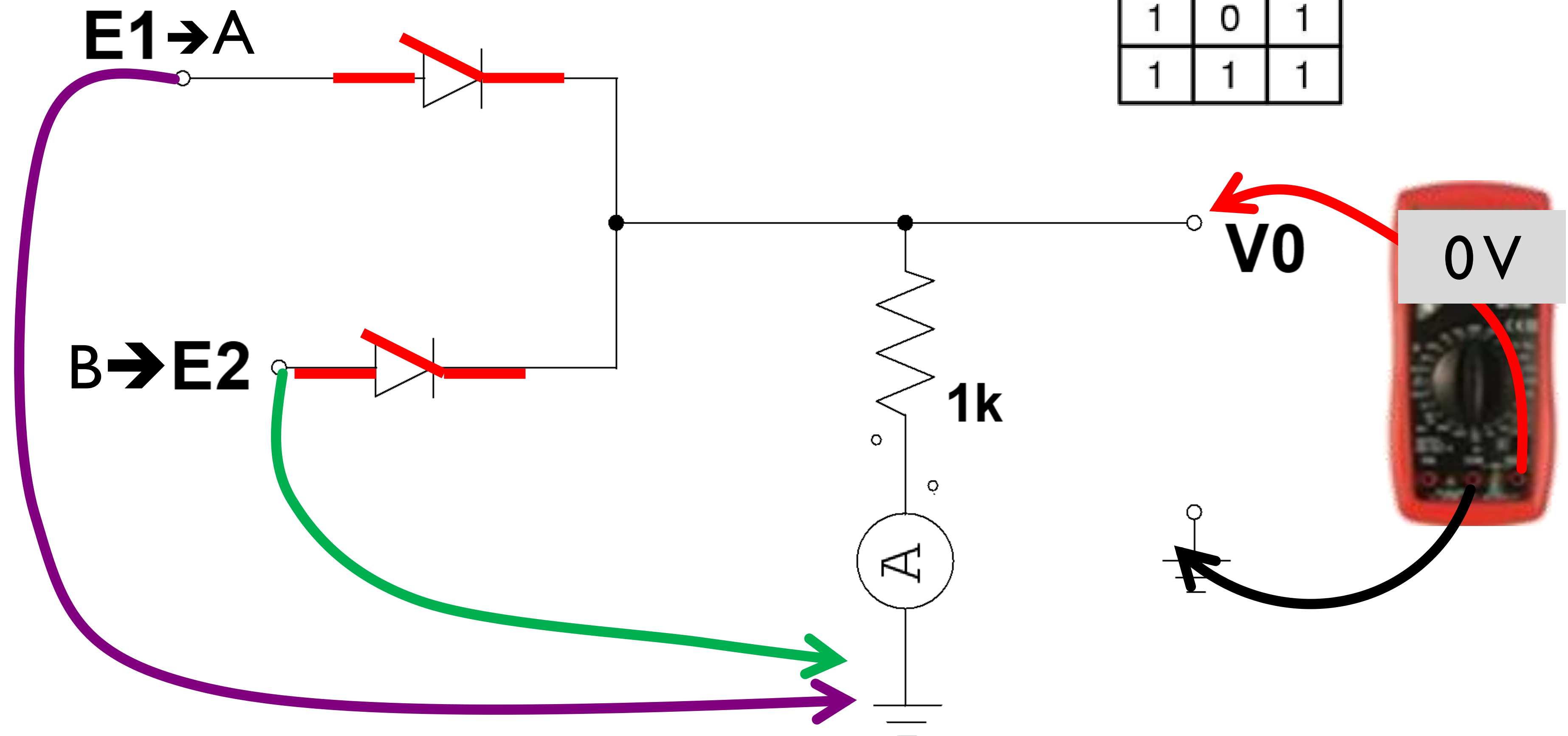


# Exercício 04: porta lógica “OU” com diodo

Sistema digital:
“0” representa **ausência** de potencial superior a $V_F$.
“1” representa **presença** de potencial superior a $V_F$.

| A | B | Vo |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

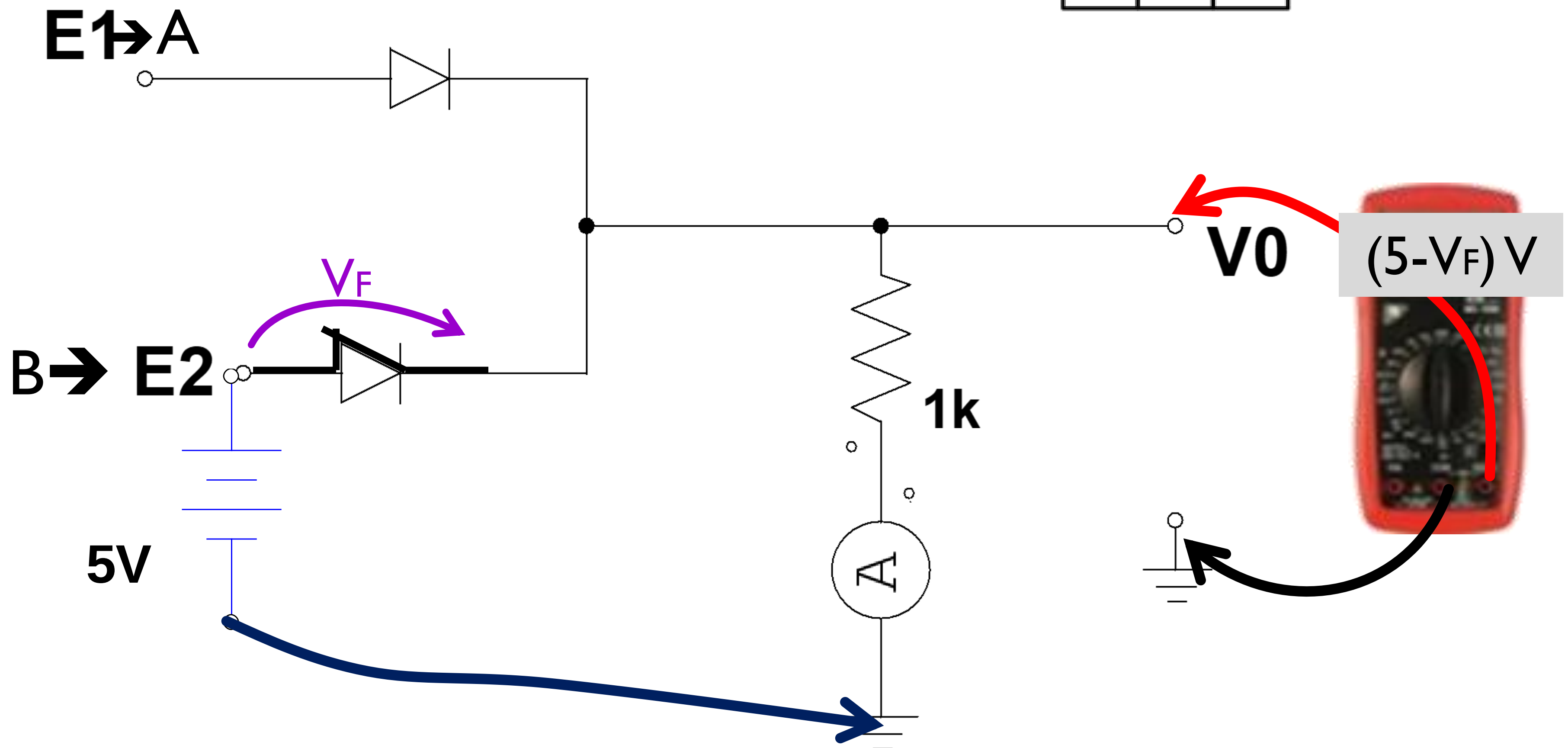




24

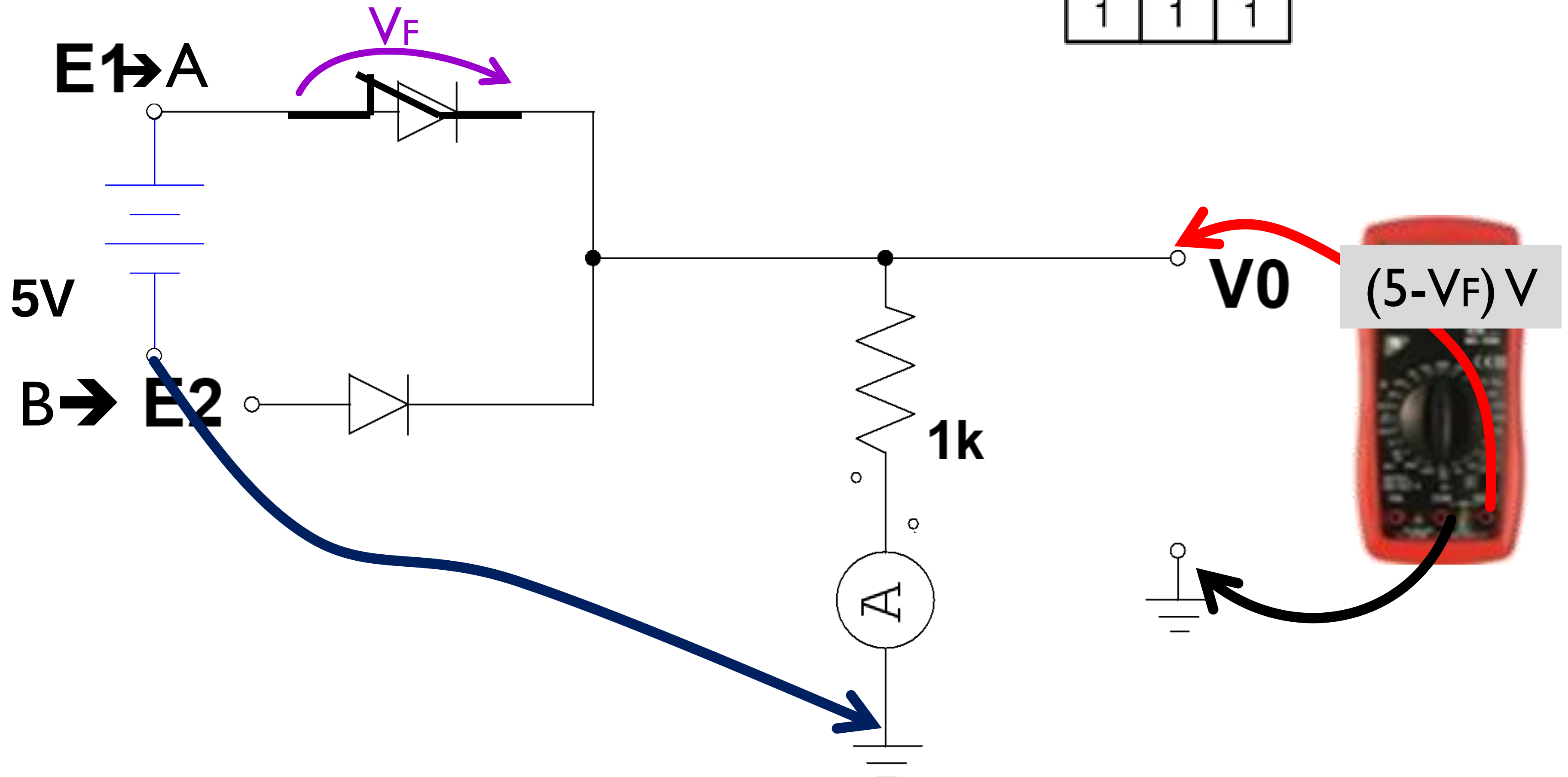
# Exercício 04: porta lógica "OU" com diodo

| A | B | Vo |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |



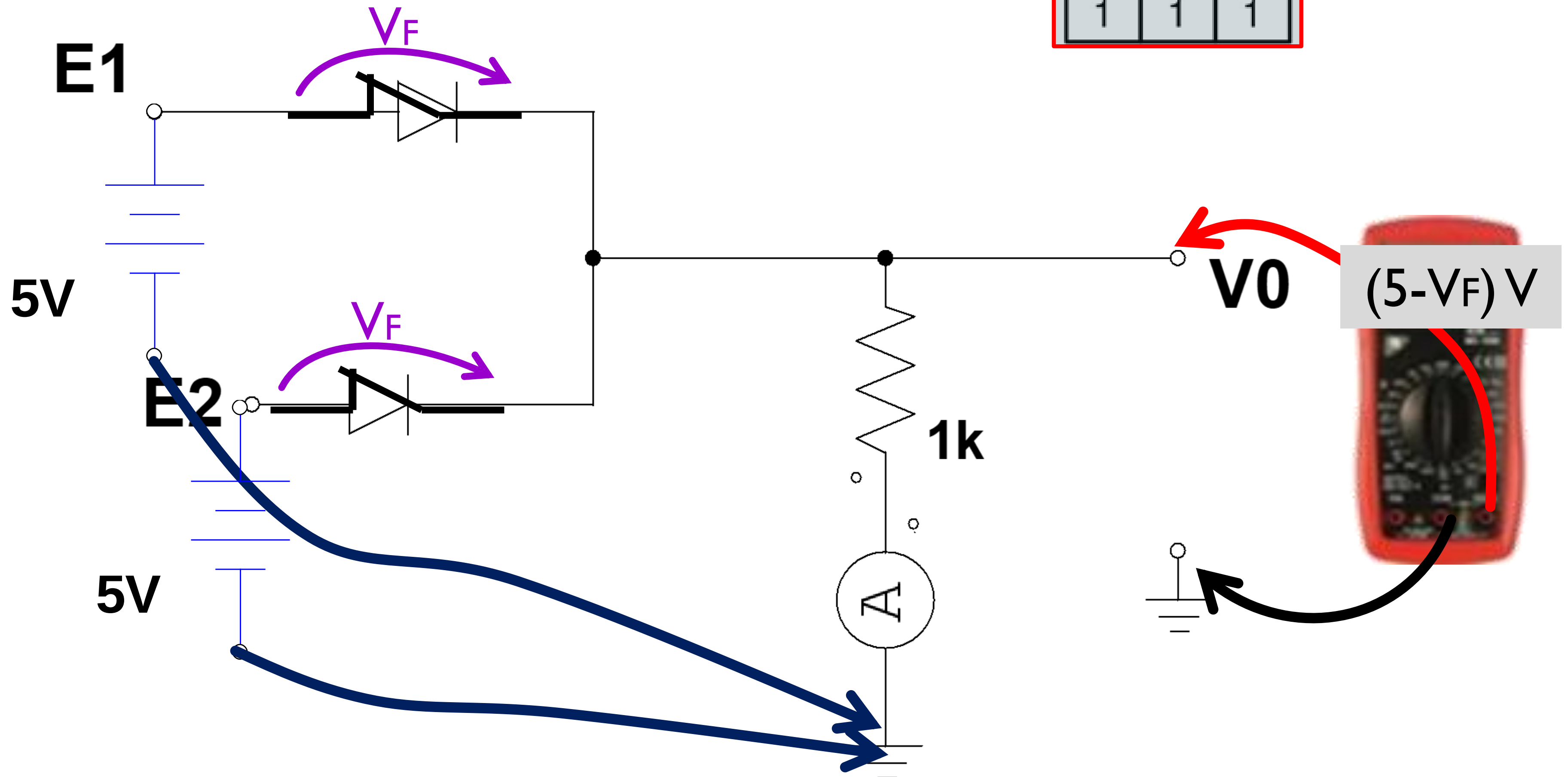
# Exercício 04: porta lógica “OU” com diodo

| A | B | Vo |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |



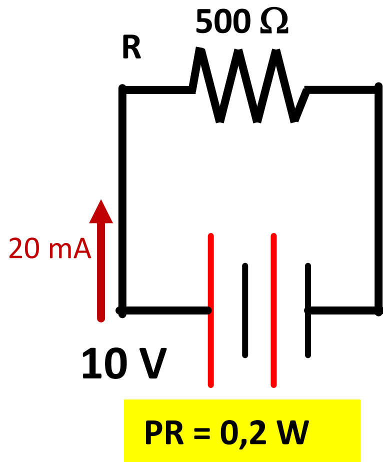
# Exercício 04: porta lógica "OU" com diodo

| A | B | Vo |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |



# Arranjo de resistores e potência comercial individual do resistor

Lab02

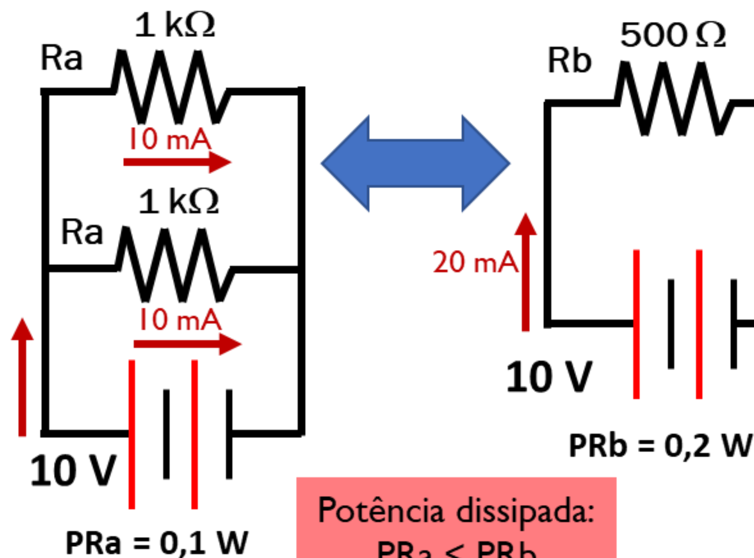


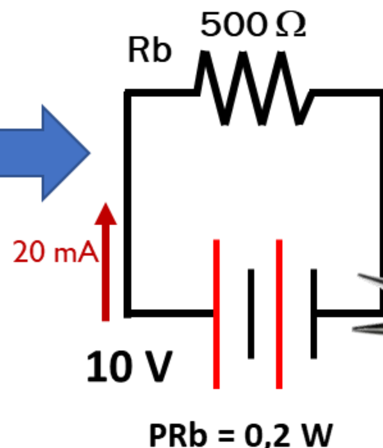

Resistores de carbono encontrados nas lojas de eletrônica normalmente ¼ W.



Esta potência é próxima a necessária para o circuito operar corretamente! ➔ ¼ W= 0,25 W ~ 0,2 W
O resistor irá aquecer, condição indesejável!

Resistores de maior potência são difíceis de encontrar e mais caros. Para contornar esta situação, são conectados resistores em paralelo para que resulte na resistência desejada, com isso a potência individual é menor, facilitando o uso de R de ¼ W.



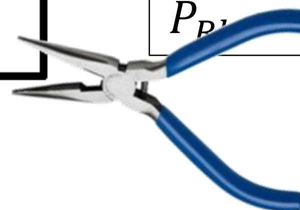




Potência dissipada:
PRa < PRb

$$P = I^2.R$$

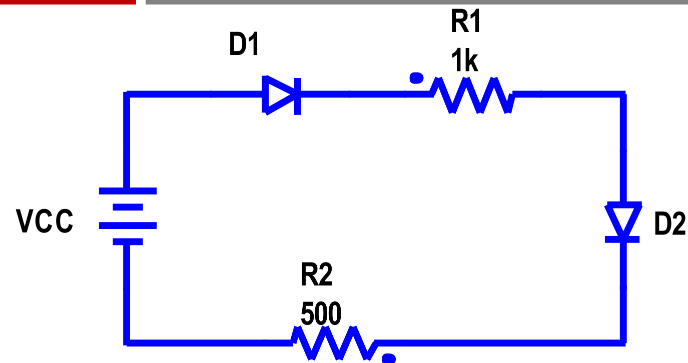
$$P_{Ra} = I^2_{Ra}.R_a = (10m)^2.1k = 0,1\ W$$

$$P_{Rb} = I^2_{Rb}.R_b = (20m)^2.500 = 0,2\ W$$



# Circuito 1: diodos de Si em série-modelo simplificado

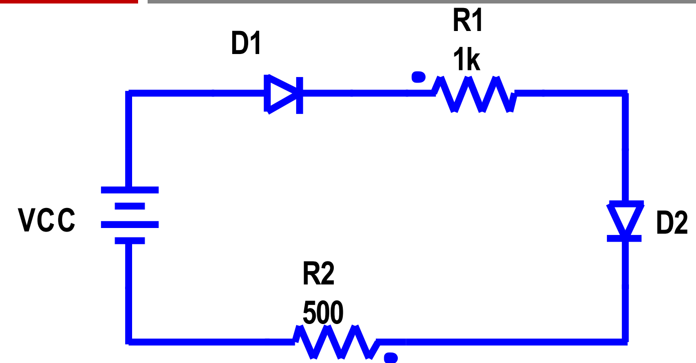
Preencha a tabela. Realize o cálculo teórico da corrente total e das quedas de tensão nos resistores, usando os valore de VCC indicados na tabela Neste cálculo adote o modelo simplificado em que Vj teórico é 0,7 V para o diodo de silício e o valor **comercial** dos resistores.




| VCC (V) | 4 | 7 | 10 | 15 |
|---|---|---|---|---|
| I (mA) | | | | |
| VR1 (V) | | | | |
| VR2 (V) | | | | |

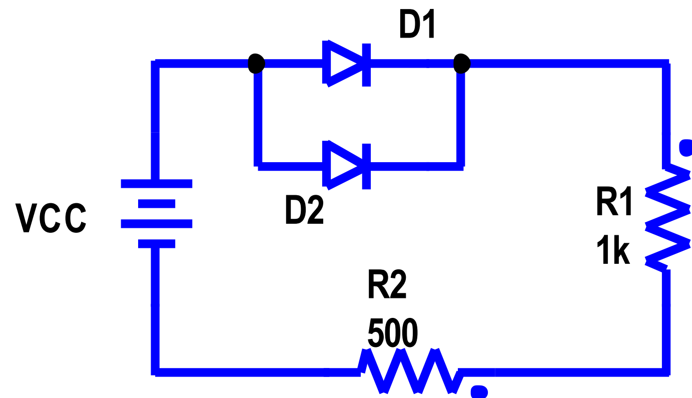
# Circuito 2: D1= Si e D2 = Ge

Preencha a tabela. Realize o cálculo teórico da corrente total e das quedas de tensão nos resistores, usando os valore de VCC indicados na tabela. Neste cálculo adote o modelo simplificado em que $V_{F_Si}$ teórico é 0,7 V, $V_{F_Ge}$ teórico é 0,3 V e o valor **comercial** dos resistores.




| **VCC (V)** | **1** | **5** | **8** | **15** | **20** |
|---|---|---|---|---|---|
| **I (mA)** | | | | | |
| **VR1 (V)** | | | | | |
| **VR2 (V)** | | | | | |

# Circuito 3: diodos de Si em paralelo-modelo simplificado



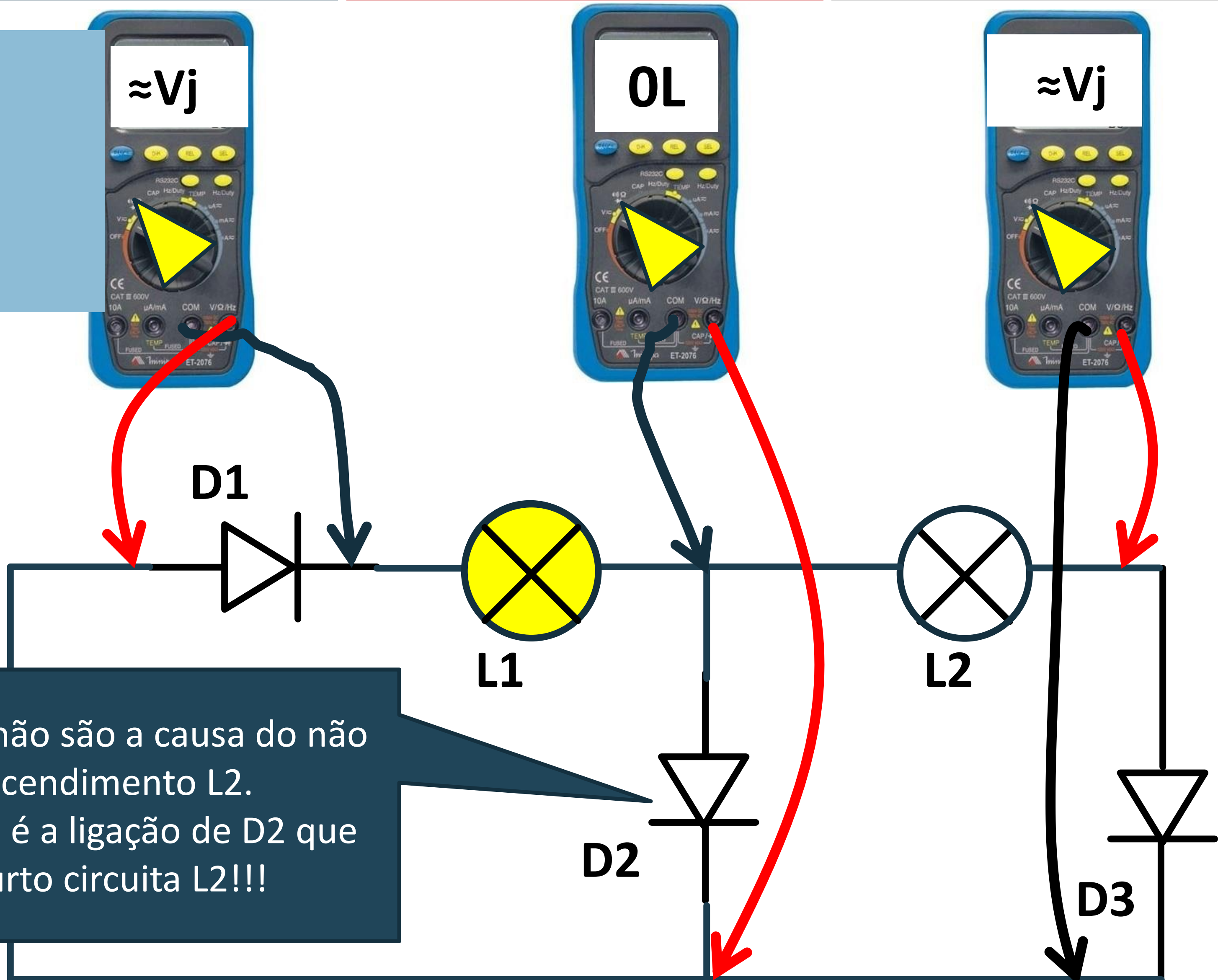

Preencha a tabela utilizando os mesmos critérios usados para os circuitos anteriores.

| VCC (V) | 4 | 7 | 10 | 15 |
|---|---|---|---|---|
| I (mA) | | | | |
| VR1 (V) | | | | |
| VR2 (V) | | | | |

# Exercício 05: Qual diodo está defeituoso - L2 não acende

ENQUETE

A = nenhum
B = D2
C = D3
D = D1 e D2
E = D2 e D3

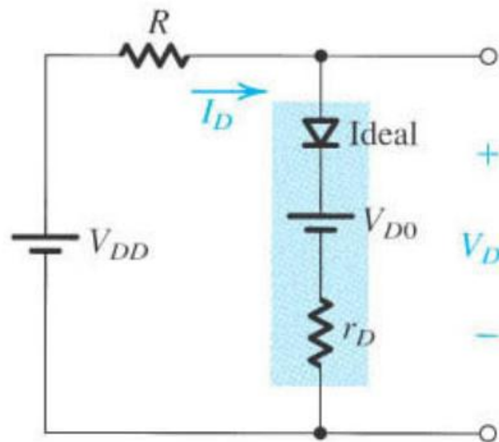



Diodos não são a causa do não acendimento L2.
A causa é a ligação de D2 que curto circuita L2!!!

# Exercício 06

Determine os valores da corrente ID e da tensão VD para o circuito.

Dados: $V_{DD}$=5 V, R=1 kΩ, $V_{D0}$=0,65 V e $r_D$=20 Ω



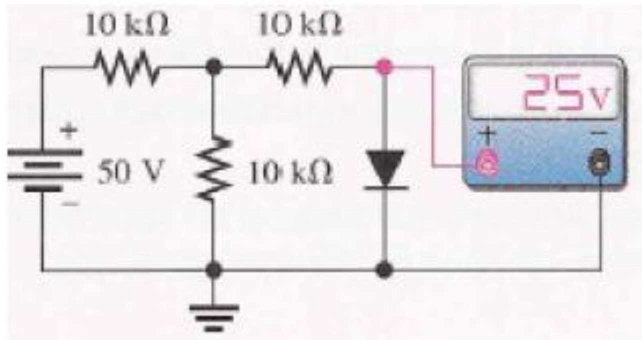

Resposta:

$$I_D = 4{,}26\, mA$$

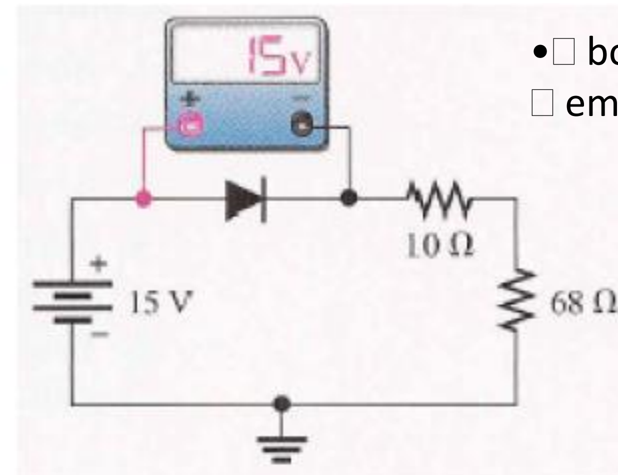
$$V_D = 0{,}735\, V$$

# Exercício 07

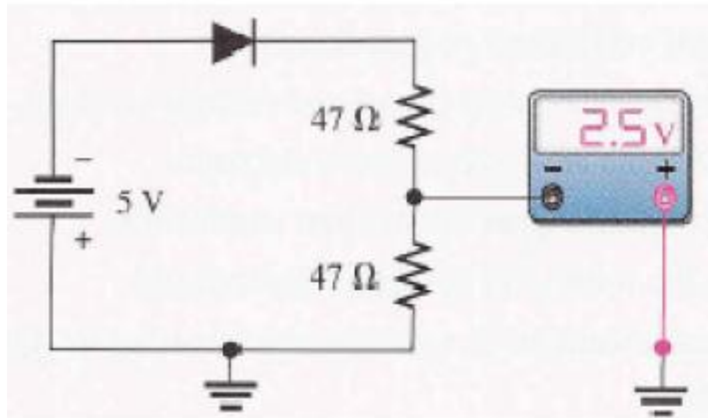
A seguir são apresentadas situações em que está indicada a tensão medida nos terminais. Pede-se para analisar as medidas e verificar se o diodo está em boas condições ou se está defeituoso. Caso seja verificado que o diodo está defeituoso em qual das duas situações ele se enquadra? Em curto circuito ou aberto? Para a análise considere o diodo como sendo ideal. Créditos: IFSC Espírito Santo – Vitória.



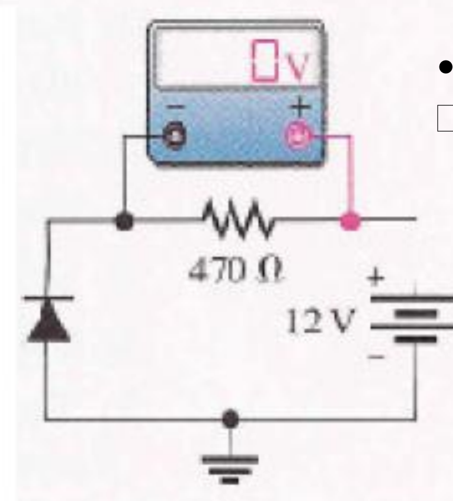

- □ boas condições □ em curto □ aberto




- □ boas condições □ em curto □ aberto



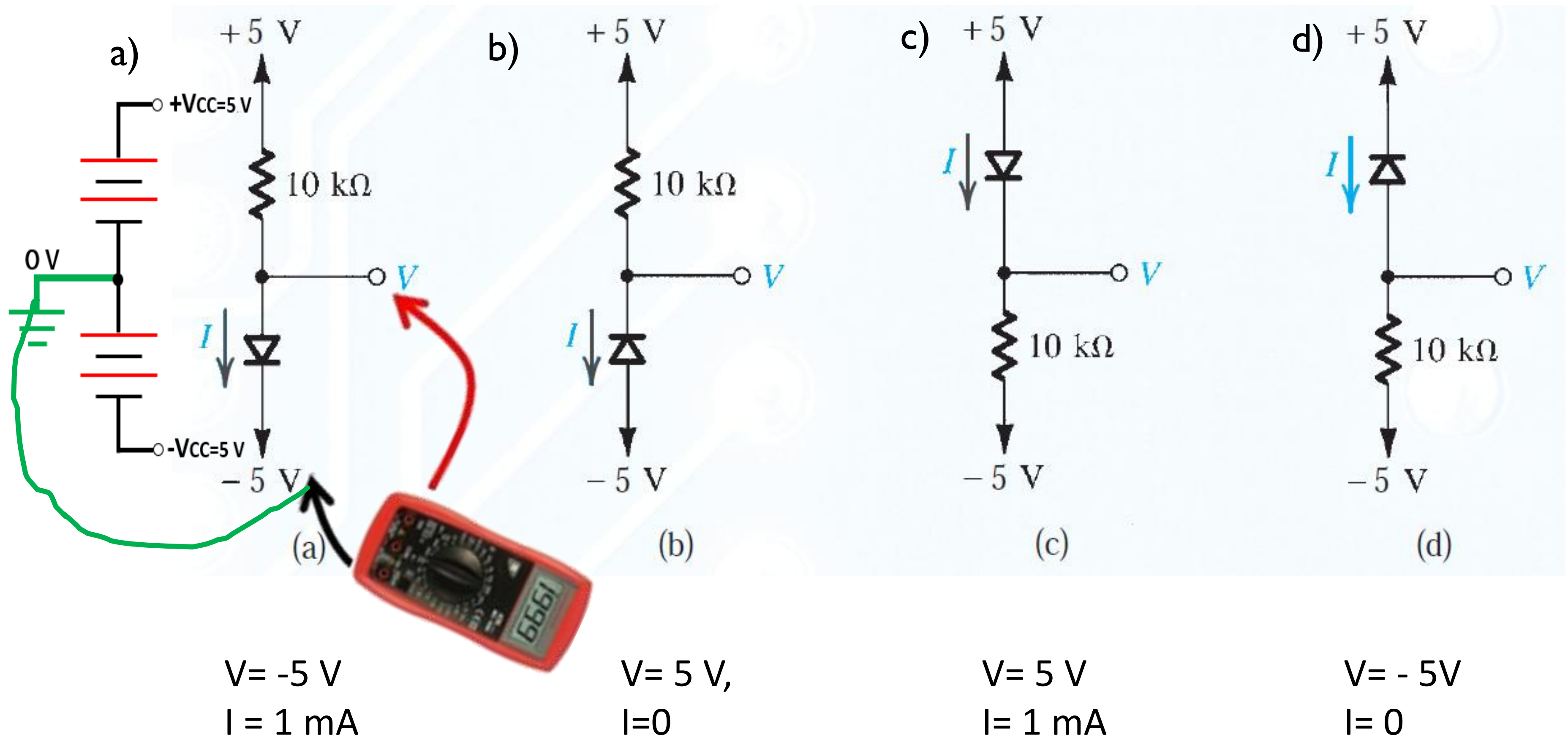

- □ boas condições □ em curto □ aberto




- □ boas condições □ em curto □ aberto

# Exercício 08

Para os circuitos abaixo, admitindo diodos IDEAIS para calcular a tensão “V” e corrente “I” para a condição:




V= -5 V
I = 1 mA

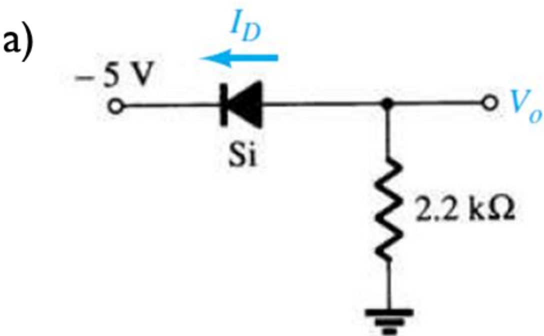
V= 5 V,
I=0

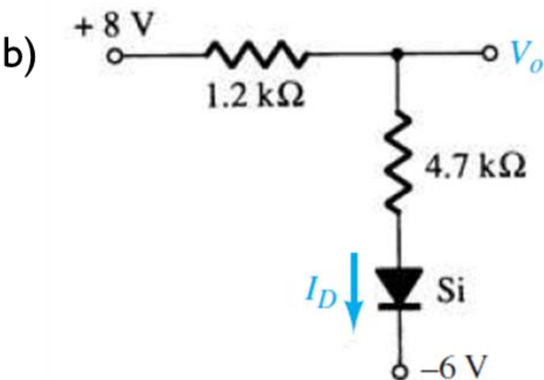
V= 5 V
I= 1 mA

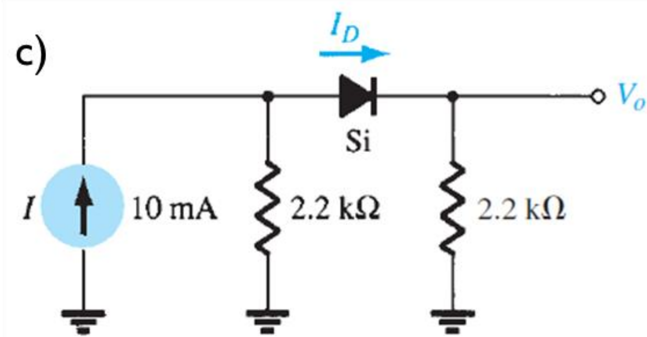
V= - 5V
I= 0

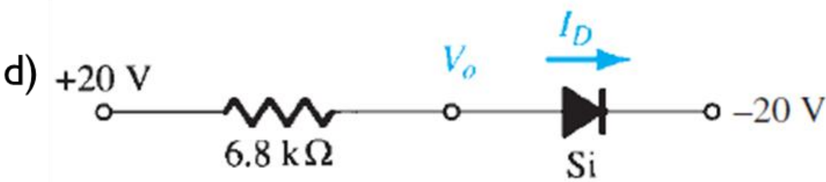
# Exercício 09

Determine Vo e ID.




a) -4,3 V, 1,955 mA  b) 5,29 V, 2,25 mA  c) 10,65 V, 4,84 mA  d) -19,3 V, 5,78 mA

Créditos: Bolylestad, R. Electronic 11th ch 2

# Exercício 10 (sobre modelo matemático)

a- A corrente de saturação de um determinado diodo é de 1,5 pA a 25 ºC. Qual é o valor aproximado para 55ºC. R:12 pA. (Bogart, 2.51)

b- A corrente direta em uma junção PN é 1,5 mA a 27ºC. Se $I_S$= 2,4.$10^{-14}$ A e $\eta$=1, qual é o valor da tensão de polarização direta na junção? R: 0,6432 V. (Bogart, 2.27)

c-Uma junção PN de Si, tem uma corrente de saturação de 1,8.$10^{-14}$ A. Suponha $\eta$=1, calcule a corrente na junção quando a tensão de polarização direta de 0,6 V e temperatura de 27 ºC. R: 0,2118 mA (Bogart, 2.25)

# Próximas aulas:

1. Visualização do vídeo Diodo Zener de minha autoria em https://youtu.be/uhHnevjJVkE (14’)

2. Leitura do cap. 5, seções 5.1 a 5.8 do livro do Malvino que trata sobre diodo zener e LED em https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555776/cfi/156!/6/4@0.00:20.4

3. Leitura do cap. 3 do livro do Garcia que trata sobre o diodo zener em https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520339/cfi/41!/6/2@100:0.00

4. Leitura do cap. 5, seções 5.1 e 5.2 do livro do Salomão sobre diodo zener e LED em https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518374/cfi/79!/6/4@0.00:37.3

5. OPCIONAL: Realização dos exercícios extras no bloco EXERCÍCIOS EXTRAS PARA A 1ª PROVA.C